第 37 卷第 4 期　　　生　态　学　报　　　Vol.37,No.4
2017 年 2 月　　　ACTA ECOLOGICA SINICA　　　Feb.,2017

DOI: 10.5846/stxb201604150688
刘顺,罗达,刘千里,张利,杨洪国,史作民.川西亚高山不同森林生态系统碳氮储量及其分配格局.生态学报,2017,37(4):1074-1083.
Liu S, Luo D, Liu Q L, Zhang L, Yang H G, Shi Z M.Carbon and nitrogen storage and distribution in different forest ecosystems in the subalpine of western Sichuan.Acta Ecologica Sinica,2017,37(4):1074-1083.

川西亚高山不同森林生态系统碳氮储量及其分配格局

刘　顺[1],罗　达[1],刘千里[2],张　利[2],杨洪国[3],史作民[1,4,*]
1 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所,国家林业局森林生态环境重点实验室,北京　100091
2 阿坝州林业科学技术研究所, 汶川　623000
3 中国林业科学研究院, 北京　100091
4 南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 南京　210037

摘要:森林采伐和恢复是影响森林碳氮储量的重要因素。以川西亚高山岷江冷杉原始林、粗枝云杉阔叶林、天然次生林和粗枝云杉人工林为研究对象,采用样地调查和生物量实测的方法,研究了不同森林生态系统各组分碳、氮储量及其分配特征。结果表明岷江冷杉原始林、粗枝云杉阔叶林、天然次生林和粗枝云杉人工林生态系统碳储量分别为 611.18、252.31、363.07 tC/hm^{2}和 239.06 tC/hm^2;氮储量分别为 16.44、12.11、15.48 tN/hm^{2}和 8.92 tN/hm^2。恢复林分与原始林碳储量在土壤—植被的分配格局发生了变化,而氮储量未发生变化。岷江冷杉原始林以植被碳储量为主,恢复林分以土壤为主,氮储量均以土壤为主。乔木层碳储量分别占生态系统总储量的 56.65%、17.63%、13.57%和 22.05%,土壤层(0—80 cm)分别占 32.03%、69.87%、76.20%和 72.12%;土壤层氮储量占生态系统总储量的 76.80%—92.58%。植物残体碳氮储量分别占生态系统总储量的 4.40%—9.83%和 2.94%—7.08%,林下植被所占比例最小。空间格局上,岷江冷杉原始林植被部分具有较高的碳储量,应进行保护。3 种恢复林分具有较高的碳汇潜力,且地上/地下碳储量较低,表明其碳汇潜力尤其表现在地上部分。天然次生林利于土壤有机碳的积累,而人工林乔木层碳储量较高。

关键词:碳氮储量;分配;原始林;恢复林分;川西亚高山

Carbon and nitrogen storage and distribution in different forest ecosystems in the subalpine of western Sichuan

LIU Shun[1], LUO Da[1], LIU Qianli[2], ZHANG Li[2], YANG Hongguo[3], SHI Zuomin[1,4,*]
1 *Key Laboratory of Forest Ecology and Environmental Sciences, State Forestry Administration, Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing* 100091, *China*
2 *Aba Prefecture Institute of Forestry Science and Technology, Wenchuan* 623000, *China*
3 *Chinese Academy of Forestry, Beijing* 100091, *China*
4 *Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing* 210037, *China*

Abstract: Carbon (C) and nitrogen (N) are major constituents of plant and soil organic matter, and play a fundamental role in nutrient cycling, plant growth, and ecological function. Biogeochemical cycling of C and N has attracted much attention because of oxides released from ecosystems to the atmosphere are important factors driving global warming, and N availability limits plant productivity. Forests are the main C pool in terrestrial ecosystems and have a substantial influence on the global C cycle and atmosphere carbon dioxide (CO_2) concentrations. However, C and N storage in forests vary greatly because of differences in forest type, forest age, regional climate, and soil conditions. Forest harvest and restoration lead to different forest types and structures, which are important factors in decreasing and increasing C and N stocks. As such,

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(CAFYBB2014MA004); 国家"十二五"科技支撑计划课题资助项目(2012BAD22B0102)
收稿日期:2016-04-15;　　**修订日期**:2016-08-15
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: shizm@ caf.ac.cn

research on C and N storage in each component of the forest ecosystems will be beneficial in the evaluation of the impact of different management regimes on C and N pools. The subalpine forest in western Sichuan is important for water resource conservation and is an ecological barrier in the upper reaches of the Yangtze River. Historically, large area of fir were cut down, and the area was restored with three different forest types (including plantation, natural secondary forest, forest under mixed influence of artificial and natural sources), which have different species composition, including the presence of spruce; the change in C and N stores is still unknown. More studies are needed to calculate C and N pools in this region because of its varying topography, community diversity, and complex ecosystems. In this study, C and N stores in different forest ecosystems of *Abies faxoniana* primary forest (AF), *Picea asperata* broadleaf mixed forest (PB), natural secondary forest (NS), and *Picea asperata* plantation forest (PA) in the subalpine of western Sichuan were quantified. The results showed that ecosystem organic carbon of AF, PB, NS, and PA was 611.18, 252.31, 363.07 tC/hm^2, and 239.06 tC/hm^2, whereas nitrogen storage was 16.44, 12.11, 15.48 tN/hm^2, and 8.92 tN/hm^2. Distribution patterns of carbon storage between soil and plants, not nitrogen storage, had changed between primary and restored forests. Carbon storage of primary and restored forests was dominated by vegetation and soil, respectively, whereas nitrogen storage was dominated by soil. Carbon storage of the tree layer accounted for 56.65%, 17.63%, 13.57%, and 22.05% of ecosystem total storage, soil layer (0—80 cm) occupied 32.03%, 69.87%, 76.20%, and 72.12% for carbon storage and 76.80%—92.58% for nitrogen storage. The proportion of carbon and nitrogen storage of woody debris and litter were 4.40—9.83% and 2.94—7.08%, respectively, which were higher than that of the understory vegetation. *Abies faxoniana* primary forest had high carbon storage, and it is especially important to protect. Three kinds of restored forests had high carbon sequestration potential, especially above-ground indicated by low above- and under-ground carbon storage rations. Natural secondary forest was beneficial to soil carbon accumulation and plantation forest to tree carbon storage.

Key Words: C and N storage; distribution; primary forest; restored forest; subalpine of western Sichuan

碳和氮是植物组织的重要组成成分[1]和构成森林生态系统组分、维持养分循环和影响林木生长及生态功能发挥的重要元素[2],由于碳、氮氧化物排放是驱动全球变暖的重要因素,因此碳氮生物地球化学循环备受关注[3]。陆地生态系统碳贮量约为大气碳库的4倍,是重要的碳库之一[4]。森林是陆地生态系统的主体,森林植被年固定CO_2量占大气CO_2总量的4.6%[5],年呼吸速率达4.85—25.46 tC/hm^2[6],因此森林生态系统对陆地生态系统碳收支和大气CO_2浓度具有重要影响[7]。森林生态系统碳氮存在耦合效应[8],其碳收支受土壤氮有效性限制[9],氮能够促进植物生长[10],减少呼吸作用的CO_2释放[11-12],降低有机质的分解[13],从而增加生态系统NPP和碳储量[14-15]。但过量的氮可能引起土壤酸化,植物NPP下降[16],降低生态系统碳储量。研究生态系统碳氮储量有助于了解生态系统固碳与氮素吸存关系。森林类型的改变影响了生态系统植物组成、种群结构和生产力水平,并通过改变凋落物、根系分泌物及土壤微生物群落等过程影响土壤碳氮的储量。王华等[17]研究得出湖南会同中亚热带天然次生常绿阔叶林碳、氮储量(212.59 tC/hm^{2}和18.85 tN/hm^2)高于几种人工林(123.13—186.88 tC/hm^{2}和8.36—16.60 tN/hm^2),土壤层(0—100 cm)分别占52—61%和92—99%;广西凭祥南亚热带格木、红椎和马尾松人工林碳、氮储量分别为200.57—267.84 tC/hm^{2}和10.59—17.91 tN/hm^2,土壤层(0—100 cm)平均占58.71%和93.75%[18];西双版纳热带季雨林碳储量为303 tC/hm^2,植被碳储量所占比例(70%)高于土壤[19]。因此,研究区域不同森林生态系统碳氮储量,对准确评价区域和全球生态系统碳氮储量和生态效益具有重要作用。

川西亚高山林区位于青藏高原东南缘,地形复杂,生态脆弱,是长江上游重要的水源涵养地和生态屏障。对于该区森林的研究主要集中于森林水文[20]、土壤性质[21]、物种多样性[22]和生物量[23]等。而关于生态系统碳储量及其分配格局的研究仅有少量报道,见鲜骏仁等[24]、Zhang等[25]分别研究了王朗自然保护区和米亚罗林区5种森林生态系统的碳储量。由于该区地形变化较大、群落多样、生态系统复杂,想要精确估算该区森林碳氮储量,还需做大量的调查研究。四川理县毕棚沟自然保护区保留了大量的原始林,还存有大面积砍伐后经不同方式恢复的林分,是研究川西亚高山不同森林生态系统碳氮储量及其分配格局较好的场所,但未见该区域森林生态系统碳氮储量研究的报道。因此,本文对毕棚沟自然保护区4种典型森林生态系统碳氮储量进

行研究,旨在定量计算不同林分各组分和生态系统碳氮储量特征,评价森林不同恢复途径对生态系统各组分碳氮固持能力的影响,以期为区域或国家尺度的森林碳氮精确估算提供科学数据。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

研究地点位于四川省阿坝藏族羌族自治州理县境内的毕棚沟自然保护区(102°53′—102°57′E,31°14′—31°19′N),海拔 2458—4619 m,属于青藏高原—四川盆地的过渡地带。年平均气温 2.7 ℃,最高气温 23 ℃(7 月),最低气温-18 ℃(1 月);年均降水量 850 mm[26],多集中在生长季。研究区内主要森林类型为亚高山原始暗针叶林[27]。在 20 世纪 50—80 年代,以冷杉为优势树种的原始暗针叶林被大面积的采伐利用,之后进行了以云杉为主的人工更新[28],同时,在一部分地区进行着以桦木等阔叶先锋树种为主的天然更新[29]。1998 年,天然林资源保护工程启动,该区森林禁伐封育,现已形成人工林、天然次生林以及人工、天然更新共同作用形成的林分镶嵌分布[20]。典型优势乔木有岷江冷杉(*Abies faxoniana*)、红桦(*Betula albo-sinensis*)和粗枝云杉(*Picea asperata*)等;灌木主要有康定柳(*Salix paraplesia*)、箭竹(*Fargesia spathacea*)、红毛花楸(*Sorbus rufopilosa*)、高山杜鹃(*Rhododendron delavayi*)和三颗针(*Berberis julianae*)等;主要草本为苔草(*Carex tristachya*)、蟹甲草(*Cacalia auriculata*)和高山冷蕨(*Cystopteris montana*)等。土壤为山地棕壤,石砾含量较多。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置

本研究选择 4 种类型森林作为对象,分别为岷江冷杉原始林、粗枝云杉人工林、粗枝云杉阔叶林(其中粗枝云杉为人工栽植,后无人为经营管理,林内混生红桦等阔叶树)和天然次生林,各林分的具体情况见表 1。岷江冷杉原始林和粗枝云杉人工林采用随机设置的方法;由于采伐后粗枝云杉的栽植方式为块状,所以形成了粗枝云杉阔叶林和天然次生林交替分布的格局,选择交替分布的粗枝云杉阔叶林和天然次生林进行样地布设,各森林类型均设置 3 块 20 m×20 m 的样地作为重复。在每个样地中按照对角线方向设置 5 个 2 m×2 m 的小样方用于林下灌木生物量的调查,同样的方法设置 5 个 1 m×1 m 的小样方用于草本、苔藓生物量和凋落物现存量的测定。

表 1 不同森林类型的基本情况

Table 1 Characteristics of different forest types

森林类型 Forest types	海拔 Altitude/m	坡度 Slope/(°)	坡向 Aspect	林龄 Age/a	胸径 DBH/cm	树高 Height/m	密度 Density/(株/hm²)
岷江冷杉原始林 *Abies faxoniana* primary forest (AF)	3500	36	ES	192	39.81	20.14	366.67
粗枝云杉阔叶林 *Picea asperata* broadleaved mixed forest (PB)	3000	38	ES	28	9.02	6.07	2260.62
天然次生林 Natural secondary forest (NS)	3000	35	ES	30	9. 50	10.19	2083.33
粗枝云杉人工林 *Picea asperata* plantation forest (PA)	2900	—	—	30	11.40	8.28	1433.33

—表示林地较平缓,未记坡度和坡向,ES 代表东南坡向

1.2.2 生物量与凋落物量测算

对标准样地内的乔木进行每木检尺,记录物种名、胸径和树高。根据沈金亮等[30]和江洪等[31]所建立的生物量预测模型直接估算不同器官(叶、枝、干和根)的生物量。采用“收获法”测定样方内的灌木和草本(地上、地下部分)、苔藓的鲜重,以及木质残体(包括由直径≥10 cm 的枯立木、倒木、根桩和大枝等组成的粗木质残体,1 cm≤直径<10 cm 的细木质残体[32];粗木质残体储量测定参考张海东[33]的研究方法,细木质残体采用

样方“收获法”)、凋落物层的现存量。凋落物层分为未分解层(fresh litter layer,LL)、半分解层(fragmented litter layer,FL)和分解层(humified litter layer,HL)。对以上各组分取样,带回实验室,计算生物量。

1.2.3　样品采集、处理与测定

对 1.2.2 中提到的各组分分别采集样品,带回实验室,经烘干、粉碎和过筛(60 目)后,供碳氮含量测定。同时,在各样地内,按梅花形挖 5 个土壤剖面,按 0—10、10—20、20—40、40—60 cm 和 60—80 cm 分层采样(部分未达 80 cm 深的按 80 cm 计算)。土壤剖面每层用 100 cm^3环刀取样,105 ℃下烘干测定容重;之后,每层分别采集土壤样品,并将同样地同层次的样品按质量比例混匀,带回实验室自然风干,过筛(100 目)后供碳氮含量测定。

碳、氮含量分别采用重铬酸钾氧化—外加热氧化法和凯氏法测定[34]。

1.2.4　碳氮储量的计算

植被层部分(乔木层、灌木层、草本层、苔藓、木质残体和凋落物层)碳氮储量为每部分碳氮含量乘以其生物量计算。

土壤层碳氮储量由各土层碳氮储量累计而得,计算公示如下[35]:

$$TX = \sum_{i=1}^{n} (X_i \times L_i \times BD_i \times 0.1)$$

式中,TX 为碳或氮的储量(t/hm^2);X_i 为第 i 层土壤有机碳或氮的含量(g/kg);L_i 为第 i 土层厚度(cm);BD_i 为第 i 层土壤容重(g/cm^3);0.1 为单位转换系数。

1.2.5　数据处理

采用单因素方差分析检验不同森林类型间碳氮储量的差异($N=3$),并用最小显著差异法(LSD)进行多重比较,显著性差异检验在 0.05 水平。采用 SPSS 17.0 和 Origin 8.0 进行统计分析和制图。

2　结果与分析

2.1　植被层碳氮储量及其分配格局

岷江冷杉原始林植被层(包括乔木层、林下植被层和植物残体)碳、氮储量显著高于粗枝云杉阔叶林、天然次生林和粗枝云杉人工林(C:$F=1168.76$,$P<0.05$;N:$F=290.36$,$P<0.05$)。碳储量分别为 415.43、76.02、86.41 tC/hm^2和 66.65 tC/hm^2;氮储量分别为 3.82、1.41、1.15 tN/hm^2”和 0.96 tN/hm^2。

2.1.1　乔木层

乔木层碳氮储量是植被层碳氮储量的主体,约占植被层碳氮储量的 57.00%—83.34% 和 43.35%—63.47%。乔木层碳、氮储量在不同森林类型间的变化略有差异,以岷江冷杉原始林乔木层碳、氮储量最高,分别为 346.24 tC/hm^2和 2.42 tN/hm^2。粗枝云杉阔叶林、天然次生林和粗枝云杉人工林乔木层碳储量分别仅为岷江冷杉原始林的 12.85%、14.22%和 15.22%;乔木层氮储量分别仅为岷江冷杉原始林的 25.13%、20.79%和 20.54%。乔木层碳氮储量在粗枝云杉阔叶林、天然次生林和粗枝云杉人工林间差异并不显著(表 2)。乔木层碳储量主要分布于树干,其碳储量占乔木层的 43.30%—56.66%,而氮储量在乔木不同器官中的分配比较分散,其分配格局在不同林型间的变化较大。

2.1.2　植物残体层

植被层碳氮储量的第二大组成部分为植物残体层(木质残体和凋落物),碳氮储量分别介于 10.53—60.06 tC/hm^2和 0.37—1.16 tN/hm^2,分别占乔木层碳氮储量的 14.46%—33.97%和 30.52%—39.64%。植物残体碳储量在不同森林类型间均差异显著,而氮储量只表现为岷江冷杉原始林显著大于其它森林类型($P<0.05$)。岷江冷杉原始林植物残体碳储量最大(60.06 tC/hm^2),其次分别为天然次生林(29.36 tC/hm^2)、粗枝云杉阔叶林(17.27 tC/hm^2)和粗枝云杉人工林(10.53 tC/hm^2);岷江冷杉原始林植物残体氮储量为 1.16 tN/hm^2,分别是天然次生林、粗枝云杉阔叶林和粗枝云杉人工林的 2.71、2.56 倍和 3.14 倍。岷江冷杉原始林、粗枝云杉阔

叶林和天然次生林中木质残体碳储量对植物残体碳储量的贡献较高,所占比例分别为 71.31%、63.23%和 76.37%,粗枝云杉人工林中仅占 22.52%;与碳储量的组成不同,不同林型植物残体氮储量均以凋落物的贡献较高,粗枝云杉人工林凋落物氮储量占植物残体氮储量的比例高达 93.17%,其它 3 种林型的比例较接近,为 60.68%—63.74%。

2.1.3 林下植被层

林下植被层碳氮储量分别占植被层碳氮储量的 2.20%—18.76%和 6.01%—26.01%,总体呈现为灌木层>苔藓层>草本层,地上部分>地下部分。灌木层碳氮储量在不同林型间的变化总体呈现为粗枝云杉阔叶林>天然次生林>岷江冷杉原始林>粗枝云杉人工林;草本层碳氮储量总体趋势为岷江冷杉原始林>天然次生林>粗枝云杉阔叶林>粗枝云杉人工林;苔藓层碳储量变化为岷江冷杉原始林>粗枝云杉人工林>粗枝云杉阔叶林>天然次生林,氮储量变化为岷江冷杉原始林>粗枝云杉阔叶林>天然次生林>粗枝云杉人工林。

表 2 不同森林类型植被层碳、氮储量

Table 2 Vegetation C and N storage in different forest types

组分 Components	岷江冷杉原始林 *A. faxoniana* primary forest		粗枝云杉阔叶林 *P. asperata* broadleaved mixed forest		天然次生林 Natural secondary forest		粗枝云杉人工林 *P. asperata* plantation forest	
	碳储量/ (tC/hm^2)	氮储量/ (tN/hm^2)	碳储量/ (tC/hm^2)	氮储量/ (tN/hm^2)	碳储量/ (tC/hm^2)	氮储量/ (tN/hm^2)	碳储量/ (tC/hm^2)	氮储量/ (tN/hm^2)
乔木层 Tree layer								
干 Stem	172.14±7.94aA	0.56±0.03bA	19.26±3.04aB	0.07±0.01cB	27.11±3.84aB	0.10±0.02aB	23.88±2.19aB	0.08±0.01dB
枝 Brunch	34.22±1.63cA	0.40±0.02dA	14.67±3.51bB	0.28±0.07aB	8.66±3.56bC	0.16±0.07aC	11.01±1.08bBC	0.14±0.01bC
叶 Leaf	23.37±0.13dA	0.49±0.004cA	4.61±.075cC	0.18±0.04bB	3.88±1.04bC	0.14±0.05aB	6.27±.61cB	0.17±0.02aB
根 Root	116.51±6.97bA	0.97±0.06aA	5.95±0.87cB	0.08±0.01cB	8.81±1.65bB	0.11±0.02aB	11.54±1.08bB	0.11±0.01cB
合计 Total	346.24±16.40A	2.42±0.11A	44.49±2.52B	0.61±0.06B	49.25±4.86B	0.50±0.11B	52.71±4.80B	0.50±0.05B
灌木层 Shrub layer								
地上部分 Aboveground	3.08±0.92aB	0.06±0.02aB	9.13±0.16aA	0.19±0.01aA	4.68±0.67aB	0.07±0.01aB	0.89±0.18aD	0.02±0.004aC
地下部分 Underground	2.17±0.13aB	0.04±0.005aB	3.18±0.12bA	0.10±0.01bA	1.20±0.23bC	0.03±0.01bC	0.42±0.06bD	0.01±0.001bD
合计 Total	5.26±0.83B	0.10±0.02B	12.31±0.21A	0.28±0.02A	5.89±0.90B	0.10±0.02B	1.31±0.24C	0.03±0.01C
草本层 Herb layer								
地上部分 Aboveground	0.72±0.20aA	0.03±0.01aAB	0.56±0.15aAB	0.02±0.01aAB	0.53±0.08aAB	0.03±0.004aA	0.41±0.09aB	0.02±0.005aB
地下部分 Underground	0.41±0.09aA	0.02±0.004aA	0.23±0.15aB	0.01±0.001bB	0.29±0.09bAB	0.02±0.005bAB	0.33±0.02aAB	0.01±0.001aAB
合计 Total	1.13±0.26A	0.04±0.01A	0.79±0.16AB	0.03±0.01B	0.82±0.16AB	0.04±0.01AB	0.74±0.11B	0.03±0.01B
苔藓层 Moss layer	2.75±0.46A	0.08±0.01A	1.16±0.13B	0.05±0.01B	1.09±0.14B	0.05±0.004B	1.36±0.14B	0.04±0.003B
林下植被合计 Understory vegetation	9.13±0.18B	0.23±0.01B	14.26±0.23A	0.37±0.03A	7.80±0.99C	0.19±0.02C	3.41±0.49D	0.09±0.01D
木质残体 WD	42.83±2.54A	0.46±0.06A	10.92±1.33C	0.16±0.01B	22.42±5.92B	0.17±0.06B	2.37±0.21D	0.03±0.01C
凋落物层 Litter layer								
未分解层 LL	3.33±0.27bA	0.10±0.01bA	1.26±0.26cC	0.05±0.01cC	1.87±0.31bBC	0.06±0.01bBC	2.06±0.52bB	0.07±0.003cB
半分解层 FL	8.56±2.07aA	0.34±0.09aA	3.13±0.46aB	0.13±0.02aB	3.53±4.16aB	0.15±0.03aB	4.16±0.20aB	0.18±0.01aB
分解层 HL	5.34±0.55bA	0.26±0.01aA	1.96±0.11bB	0.09±0.001bB	1.54±0.19bB	0.07±0.01bC	1.93±0.23bB	0.09±0.003bB
合计 Total	17.23±2.81A	0.71±0.11A	6.35±0.82B	0.27±0.03B	6.94±0.67B	0.28±0.03B	8.16±0.45B	0.35±0.01B

表中数据为平均值±标准误;同列不同小写字母表示不同组分间差异显著,同行相同指标间不同大写字母表示不同林分间差异显著

2.2 土壤层碳氮储量及其分配格局

2.2.1 土壤碳氮含量

林型和土层深度显著影响土壤碳(林型:$F=6.551$,$P=0.007$;土层:$F=5.862$,$P=0.008$)、氮(林型:$F=5.372$,$P=0.014$;土层:$F=3.405$,$P=0.044$)含量。随着土层深度的增加,土壤碳氮含量均呈下降趋势(图 2)。平均碳氮含量以天然次生林最高(55.33、2.87g/kg),其次分别为岷江冷杉原始林(39.15、2.53g/kg)、粗枝云杉阔叶林(35.26、2.14g/kg)和粗枝云杉人工林(34.48、1.59g/kg)。

2.2.2 土壤碳氮储量及其分配

不同森林类型土壤碳氮储量间存在显著差异($P<0.05$),主要表现为天然次生林显著高于其它森林类型

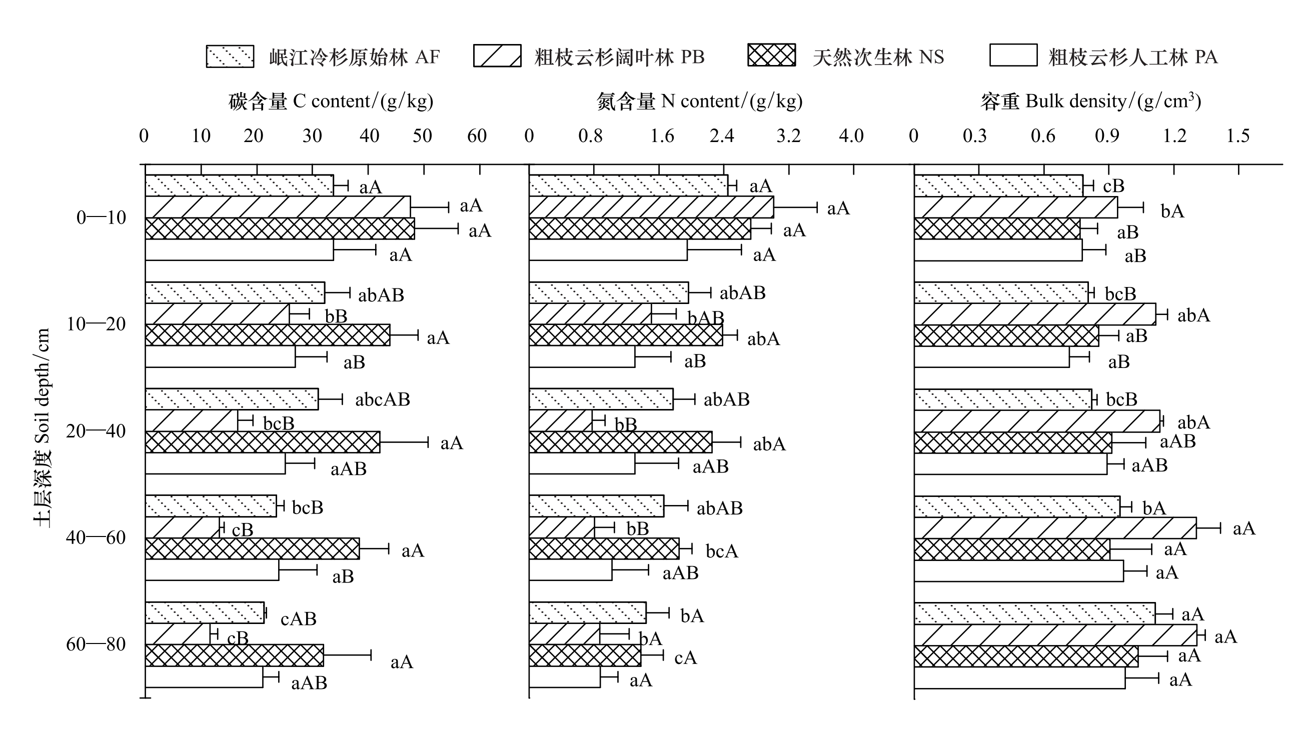


图 1　不同森林类型土壤碳氮含量和容重

Fig.1　Soil C, N content and bulk density in different forest types

图中数据为平均值±标准误;不同小写字母表示相同林分不同土层间差异显著,不同大写字母表示相同土层不同林分间差异显著(P<0.05)

(与岷江冷杉原始林和粗枝云杉阔叶林氮储量间差异不显著)。土壤碳氮储量在不同森林类型间的变化趋势一致,均为天然次生林>岷江冷杉原始林>粗枝云杉阔叶林>粗枝云杉人工林,碳储量分别为 276.67、195.75、176.29 和 172.40 tC/hm^2;氮储量分别为 14.33、12.63、10.71 tN/hm^2 和 7.96 tN/hm^2(表 3)。

表 3　不同森林类型土壤碳、氮储量

Table 3　Soil C and N storage in the different forest types

土层/cm	岷江冷杉原始林 *A. faxoniana* primary forest		粗枝云杉阔叶林 *P. asperata* broadleaved mixed forest		天然次生林 Natural secondary forest		粗枝云杉人工林 *P. asperata* plantation forest	
	碳储量/(tC/hm^2)	氮储量/(tN/hm^2)	碳储量/(tC/hm^2)	氮储量/(tN/hm^2)	碳储量/(tC/hm^2)	氮储量/(tN/hm^2)	碳储量/(tC/hm^2)	氮储量/(tN/hm^2)
0—20	52.52±6.04aAB	3.50±0.31aAB	73.20±8.34aA	4.50±0.66aA	73.18±6.88aA	4.13±0.57aA	43.72±5.75aB	2.28±0.53aB
20—40	51.06±7.57aAB	2.92±0.48aAB	37.81±6.36bB	1.77±0.37bB	75.33±16.08aA	4.17±1.10aA	43.30±5.47aAB	2.17±0.68aAB
40—60	44.70±3.67aAB	3.08±0.42aA	35.06±4.83bB	2.11±0.64bA	66.42±11.15aA	3.33±0.79aA	45.70±13.04aAB	1.93±0.85aA
60—80	47.46±3.14aAB	3.13±0.45aA	30.22±4.05bB	2.33±1.02abA	61.74±10.87aA	2.70±0.26aA	36.69±4.27aB	1.57±0.22aA
合计 Total	195.75±13.95B	12.63±1.32AB	176.29±13.81B	10.71±2.23AB	276.67±16.06A	14.33±1.19A	172.40±18.32B	7.96±2.04B

表中数据为平均值±标准误;不同小写字母表示相同林分不同土层间差异显著,不同大写字母表示相同土层不同林分间差异显著(P<0.05)

土壤碳氮储量受土壤碳氮含量和土壤容重的影响,随着土层深度的加深,不同森林类型土壤碳氮含量呈现不同的下降趋势,土壤容重呈现增加的趋势(图 1)。受土壤碳氮含量和容重的综合作用,粗枝云杉阔叶林 0—20 cm 土层碳氮储量显著高于其它土层。其它林分土壤碳储量随着土层深度的加深,虽然呈现一定的下降趋势,但在土层间未达到显著水平(表 3)。

2.3　生态系统碳氮储量及其分配格局

生态系统碳、氮储量在不同森林生态系统间的变化趋势一致,均为岷江冷杉原始林(611.18、16.44 t/hm^2)最高,其次分别为天然次生林(363.07、15.48 t/hm^2)、粗枝云杉阔叶林(252.31、12.11 t/hm^2)和粗枝云杉人工林(239.06、8.92 t/hm^2)。

生态系统碳储量分配格局在岷江冷杉原始林生态系统中表现为乔木层>土壤层>植物残体层>林下植被层;而其它生态系统均表现为土壤层>乔木层>植物残体层>林下植被层。岷江冷杉原始林、粗枝云杉阔叶林、天然次生林和粗枝云杉人工林土壤层碳储量占生态系统碳储量的比例依次是 32.03%、69.87%、76.20% 和 72.12%,分别为乔木层的 0.57、3.96、5.62 倍和 3.27 倍。不同森林生态系统氮储量主要集中在土壤层,占生态系统氮储量的比例分别为 76.80%、88.40%、92.58%和 89.25%。不同类型森林生态系统氮储量的分配格局基本一致,表现为土壤层>乔木层>植物残体层>林下植被层。

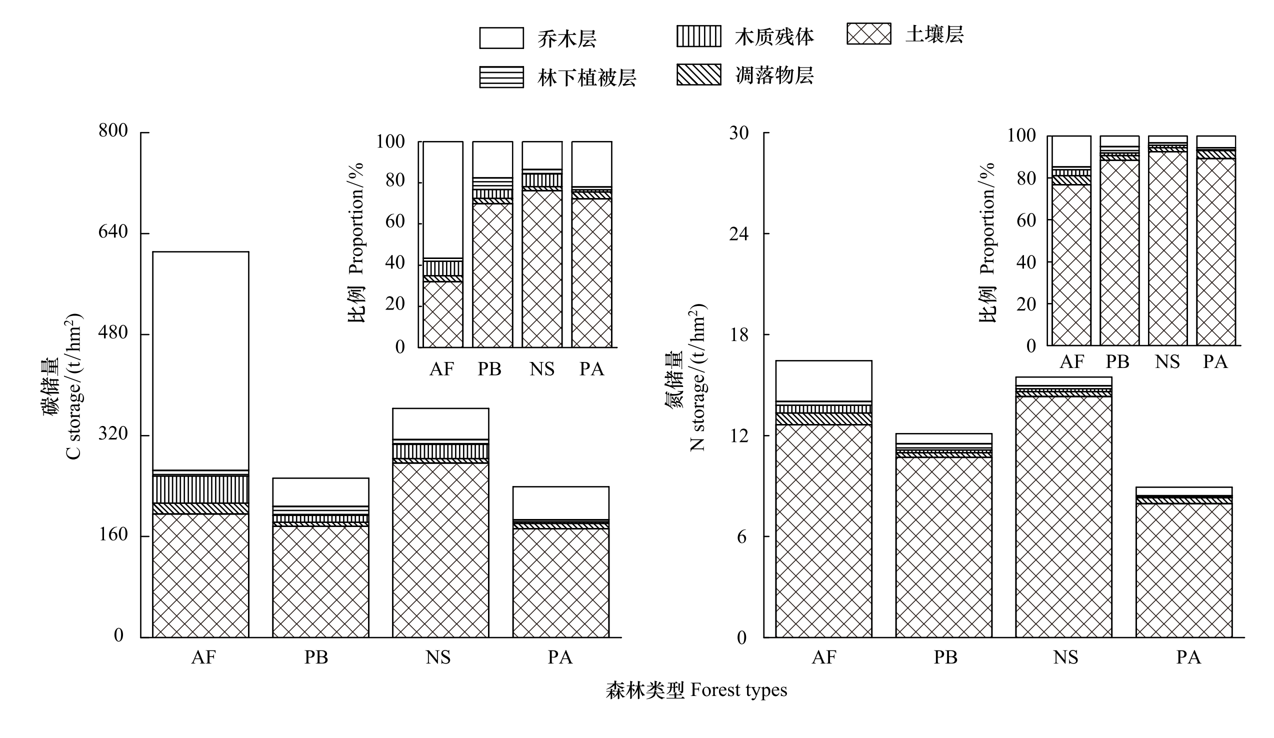


图 2 不同森林生态系统碳、氮储量及其分配

Fig.2 Distribution pattern of carbon and nitrogen storage in different forest ecosystems

AF、PB、NS 和 PA 分别代表岷江冷杉原始林、粗枝云杉阔叶林、天然次生林和粗枝云杉人工林

3 讨论与结论

土地利用/覆被变化(land use-cover change)是影响碳氮储量的重要因素[36-37]。本研究区岷江冷杉原始林生态系统碳储量高于泰国北部原始林(山地常绿林和阔叶林)的 357.62 tC/hm²[38]、我国东北地区红松原始林(—250 a)的 269.57 tC/hm²[39]、兴安落叶松原始林的 169.23—435.57 tC/hm²[40]及尖峰岭热带山地雨林原始林的 340.47 tC/hm²[41];小于温带湿润巨大王桉林(生物量碳储量高达 1867 tC/hm²)[42];略低于王朗国家级自然保护区岷江冷杉林(213.7 a)的 618.86 tC/hm²[24],表现在植被层碳储量略低。导致不同地区原始林碳氮储量差异的原因主要是环境条件(温度、降雨量和光照辐射及地形等)、林龄和形态特征以及自然干扰的影响(林火、病虫害等)[42]。不同恢复方式中以天然次生林生态系统碳储量较高,高于我国森林生态系统的平均碳密度(258.83 tC/hm²)[43],而其它两种林分均低于我国森林生态系统的平均碳密度,主要表现在土壤层碳积累的差异,可能是由于栽植粗枝云杉对土壤的人为干扰影响了土壤碳积累[44],而天然恢复的林分有助于提高土壤层的固碳量。

土壤碳氮库是生态系统的主要组成部分,已有研究表明造林后土壤碳储量表现为下降、先降低后升高、前期积累后下降并维持在一个相对恒定的水平或在土壤剖面的重新分配等不同变化趋势[45]。热带山地雨林皆伐初期(4 a)会降低土壤碳储量,经过 26 a 天然更新即可恢复[41];长白山风倒区经过 26 a 自然恢复土壤碳氮储量已基本恢复[46]。本研究得出经过近 30 年的恢复,土壤碳氮储量接近岷江冷杉原始林的水平,且天然次

生林土壤碳储量显著高于另外两种恢复方式,可能是由于相比栽植粗枝云杉,天然恢复对其土壤的扰动较小,且其林下具有大量的木质残体,其分解有利于土壤碳氮元素的补充。不同森林生态系统中,岷江冷杉原始林和天然次生林土壤碳储量高于我国森林土壤平均碳密度(193.55 tC/hm^2)[43],而土壤氮储量均低于我国森林土壤平均氮密度(34.64 tN/hm^2)[47]。这种差异主要是由土壤质地、气候条件、树种特性、年龄和群落结构等因素造成的[48]。

一般研究认为,土壤碳氮储量主要集中在表层[18, 49]。本研究得出 0—40 cm 土层土壤碳氮储量只占土壤层(0—80 cm)的 50.47%—62.97%和 50.85%—58.61%。土壤碳氮储量在垂直方向上总体呈现下降的趋势,但并未表现出明显的表层富集效应,这与六盘山森林生态系统研究结果一致[50],可能是因为研究区雨量充沛、土壤石砾含量较高,土壤淋溶作用降低了土壤碳氮储量随着深度的差异性。土壤容重较大的粗枝云杉阔叶林,由于孔隙较小,淋溶作用较小,从而表现出土壤表层碳氮储量比重高于其它林分。

虽然经过 30a 的恢复,但是不同恢复方式林分碳氮储量与岷江冷杉原始林相差较大,主要体现在植被层,这与吴仲民等[41]对尖峰岭热带山地雨林原始林和更新林碳库对比研究的结果一致。由此可见,保护原始森林植被对维持森林生态系统固碳量和森林碳平衡具有重要的作用。乔木层是植被层碳氮储量的主体,不同恢复方式林分碳储量为 44.49—52.71 tC/hm^2,小于年龄相近的南亚热带格木(29 a,100.56 tC/hm^2)、红椎(33 a,97.25 tC/hm^2)和马尾松(33 a,80.79 tC/hm^2)[18],但高于黄土丘陵区 30 a 生刺槐人工林(30.1 tC/hm^2)[51]和六盘山 22 a 生华北落叶松人工林(29.39 tC/hm^2)、51a 桦木次生林(41.81 tC/hm^2)[50];与川西夹壁沟亚高山 40a 针阔混交林(78.53 tC/hm^2,海拔相近,碳密度取 0.5)[23]和 39 a 云杉林(79.57 tC/hm^2)[2]相比,本区 3 种不同恢复林分乔木层可能有较快的碳汇能力。不同恢复方式林分氮储量为 0.50—0.61 tN/hm^2,小于会同森林生态试验站的杉木纯林(0.81 tN/hm^2)、火力楠纯林(0.86 tN/hm^2)及其混交林(0.65 tN/hm^2)[52]。木质残体和凋落物是森林生态系统的重要组成部分,对生态系统水源涵养、养分贮存和物质循环等方面具有重要的作用[53]。在计算森林碳贮量时,木质残体往往被忽略[54]。本研究得出不同森林类型植物残体碳、氮储量分别占生态系统总储量的 4.40—9.83%和 2.94—7.08%。岷江冷杉原始林木质残体碳储量高达 42.83 tC/hm^2,是其凋落物层的 2.5 倍,占地上碳储量的 15.35%,介于已有研究得出的成熟林粗木质残体占地上部 10%—20%(生物量)的范围[55-57]。粗枝云杉阔叶林和天然次生林中木质残体碳储量明显高于粗枝云杉人工林,主要是因为采伐遗留的木质残体分解较慢而得以保留,人工林由于地势平缓,栽植粗枝云杉前进行了林地清理,木质残体较少。另一个值得关注的是苔藓层具有一定的固碳能力,主要是由于该区雨水充沛,林下环境潮湿,利于苔藓生长,碳储量介于 1.09—2.75 tC/hm^2,略高于草本层碳储量。苔藓层以天然次生林最低,可能是由于该林分中间层灌、草较多,限制了苔藓的生长。

森林生态系统各组分碳氮储量受不同因素的影响,生态系统碳储量在植物和土壤间的比重受林分起源的影响。原始林经过长时间的植被生长,固定了大量的碳,因此其植被碳储量高于土壤,这与热带雨林原始林的研究结果一致[19, 41]。另外 3 种林分碳氮储量均表现为土壤层>乔木层>植物残体层,这与其它人工纯林[35, 51-52]、针阔混交林[17,52]和次生林[50]研究结果一致。3 种恢复林分生态系统碳储量较岷江冷杉原始林较低,由于成熟林碳密度可以代表相近区域森林最大碳密度[58],因此,3 种恢复林分具有较大的碳汇潜力。在空间格局上,岷江冷杉原始林地下/地上碳储量比为 1.06;粗枝云杉阔叶林、天然次生林和粗枝云杉人工林均较大,为 2.78、3.77 和 3.40,表明不同恢复林分较大的碳储存空间尤其表现在地上部分。

综合以上分析,川西亚高山岷江冷杉原始林具有较高的碳氮储量,应该对其进行合理的保护,防止碳源-汇的转变。天然次生林更有利于土壤碳储量的积累,而粗枝云杉人工林乔木层碳储量高于天然次生林,粗枝云杉阔叶林最低,可能是由于栽植对生态系统干扰以及密度较低所致。但从生态系统角度,天然恢复方式更利于生态系统碳氮的固定。另外,研究区林分存在大量的木质残体和凋落物,是潜在的碳源。在气候变化的驱动下,分解作用中 CO_2 释放对森林碳平衡的影响需要关注。

参考文献(References):

[1] Nieder R, Benbi D K. Carbon and nitrogen pools in terrestrial ecosystems//Nieder R, Benbi D K, eds. Carbon and Nitrogen in the Terrestrial Environment. Berlin Netherlands: Springer, 2008: 5-43.
[2] 刘增文, 段而军, 潘开文, 张丽萍, 杜红霞. 川西亚高山人工林碳氮分配格局及其随凋落叶分解的释放规律. 应用生态学报, 2009, 20(1): 1-6.
[3] Fu X L, Shao M G, Wei X R, Hoberton R. Soil organic carbon and total nitrogen as affected by vegetation types in Northern Loess Plateau of China. Geoderma, 2010, 155(1-2): 31-35.
[4] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. Science, 2004, 304(5677): 1623-1627.
[5] 张志华, 彭道黎. 森林管理对森林碳汇的作用和影响分析. 安徽农业科学, 2008, 36(9): 3654-3656.
[6] 王兴昌, 王传宽, 于贵瑞. 基于全球涡度相关的森林碳交换的时空格局. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008, 38(9): 1092-1102.
[7] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, Stangenberger A G. Soil carbon pools and world life zones. Nature, 1982, 298(5870): 156-159.
[8] Melillo J M, Butler S, Johnson J, Mohan J, Steudler P, Lux H, Burrows E, Bowles F, Smith R, Scott L, Vario C, Hill T, Burton A, Zhou Y M, Tang J. Soil warming, carbon-nitrogen interactions, and forest carbon budgets. Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America, 2011, 108(23): 9508-9512.
[9] Reich P B, Oleksyn J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2004, 101(30): 11001-11006.
[10] Solberg S, Andreassen K, Clarke N, Tørseth K, Tveito O E, Strand G H, Tomter S. The possible influence of nitrogen and acid deposition on forest growth in Norway. Forest Ecology and Management, 2004, 192(2-3): 241-249.
[11] Fan H B, Wu J P, Liu W F, Yuan Y H, Huang R Z, Liao Y C, Li Y Y. Nitrogen deposition promotes ecosystem carbon accumulation by reducing soil carbon emission in a subtropical forest. Plant and Soil, 2014, 379(1-2): 361-371.
[12] Janssens I A, Dieleman W, Luyssaert S, Subke J-A, Reichstein M, Ceulemans R, Ciais P, Dolman A J, Grace J, Matteucci G, Papale D, Piao S L, Schulze E-D, Tang J, Law B E. Reduction of forest soil respiration in response to nitrogen deposition. Nature Geoscience, 2010, 3(5): 315-322.
[13] Tonitto C, Goodale C L, Weiss M S, Frey S D, Ollinger S V. The effect of nitrogen addition on soil organic matter dynamics: a model analysis of the harvard forest chronic nitrogen amendment study and soil carbon response to anthropogenic N deposition. Biogeochemistry, 2014, 117(2-3): 431-454.
[14] Hyvönen R, Persson T, Andersson S, Olsson B, Ågren G I, Linder S. Impact of long-term nitrogen addition on carbon stocks in trees and soils in northern Europe. Biogeochemistry, 2008, 89(1): 121-137.
[15] Gentilesca T, Vieno M, Perks M P, Borghetti M, Mencuccini M. Effects of long-term nitrogen addition and atmospheric nitrogen deposition on carbon accumulation in picea sitchensis plantations. Ecosystems, 2013, 16(7): 1310-1324.
[16] Aber J D, Nadelhoffer K J, Steudler P, Melillo J M. Nitrogen saturation in northern forest ecosystems. Bioscience, 1989, 39(6): 378-386.
[17] 王华, 黄宇, 汪思龙, 邹冬生. 中亚热带几种典型森林生态系统碳、氮储存功能研究. 中国生态农业学报, 2010, 18(3): 576-580.
[18] 王卫霞, 史作民, 罗达, 刘世荣, 卢立华, 明安刚, 于浩龙. 我国南亚热带几种人工林生态系统碳氮储量. 生态学报, 2013, 33(3): 925-933.
[19] Lü X T, Yin J X, Jepsen M R, Tang J W. Ecosystem carbon storage and partitioning in a tropical seasonal forest in Southwestern China. Forest Ecology and Management, 2010, 260(10): 1798-1803.
[20] 张远东, 赵常明, 刘世荣. 川西亚高山人工云杉林和自然恢复演替系列的林地水文效应. 自然资源学报, 2004, 19(6): 761-768.
[21] 庞学勇, 刘庆, 刘世全, 吴彦, 林波, 何海, 张宗锦. 川西亚高山云杉人工林土壤质量性状演变. 生态学报, 2004, 24(2): 261-267.
[22] 缪宁, 周珠丽, 史作民, 冯秋红. 岷江冷杉林皆伐后次生群落结构和物种多样性的演替动态. 生态学报, 2014, 34(13): 3661-3671.
[23] 刘彦春, 张远东, 刘世荣, 张笑鹤. 川西亚高山针阔混交林乔木层生物量、生产力随海拔梯度的变化. 生态学报, 2010, 30(21): 5810-5820.
[24] 鲜骏仁, 张远彬, 王开运, 胡庭兴, 杨华. 川西亚高山 5 种森林生态系统的碳格局. 植物生态学报, 2009, 33(2): 283-290.
[25] Zhang Y D, Gu F X, Liu S R, Liu Y C, Li C. Variations of carbon stock with forest types in subalpine region of southwestern China. Forest Ecology and Management, 2013, 300: 88-95.
[26] Ni X Y, Yang W Q, Li H, Xu L Y, He J, Tan B, Wu F Z. The responses of early foliar litter humification to reduced snow cover during winter in an alpine forest. Canadian Journal of Soil Science, 2014, 94(4): 453-461.
[27] 张远东, 赵常明, 刘世荣. 川西米亚罗林区森林恢复的影响因子分析. 林业科学, 2005, 41(4): 189-193.

[28] 杨玉坡, 李承彪. 四川森林. 北京: 中国林业出版社, 1992: 1-368.
[29] 周德彰, 杨玉坡. 四川西部高山林区桦木更新特性的初步研究. 林业科学, 1980,16(2): 154-156.
[30] 沈金亮, 冯永林, 张建设, 邓东周, 邵文, 王刚, 孙志鹏, 王刚. 北川自然保护区植被恢复模式区 4 种主要树种生物量研究. 四川林业科技, 2014, 35(4): 27-31.
[31] 江洪, 朱家骏. 云杉天然林分生物量和生产力的研究. 四川林业科技, 1986, 7(2): 5-13.
[32] Harmon M E, Sexton J. Guidelines for measurements of woody detritus in forest ecosystems. Seattle: U. S. LTER Network Office, University of Washington, 1996.
[33] 张海东. 广州三种典型森林粗死木质残体(CWD)储量研究. 广州: 中山大学, 2008.
[34] 刘光崧. 中国生态系统研究网络观测与分析标准方法: 土壤理化分析与与剖面描述. 北京: 中国标准出版社, 1996.
[35] 罗达, 史作民, 王卫霞, 刘世荣, 卢立华, 明安刚, 于浩龙. 南亚热带格木、马尾松幼龄人工纯林及其混交林生态系统碳氮储量. 生态学报, 2015, 35(18): 6051-6059.
[36] Lo Y H, Blanco J A, Canals R M, De Andrés E G, Emeterio L S, Imbert J B, Castillo F J. Land use change effects on carbon and nitrogen stocks in the Pyrenees during the last 150 years: A modeling approach. Ecological Modelling, 2015, 312: 322-334.
[37] Fernández-Romero M L, Lozano-García B, Parras-Alcántara L. Topography and land use change effects on the soil organic carbon stock of forest soils in Mediterranean natural areas. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2014, 195: 1-9.
[38] Pibumrung P, Gajaseni N, Popan A. Profiles of carbon stocks in forest, reforestation and agricultural land, Northern Thailand. Journal of Forestry Research, 2008, 19(1): 11-18.
[39] 王春梅, 邵彬, 王汝南. 东北地区两种主要造林树种生态系统固碳潜力. 生态学报, 2010, 30(7): 1764-1772.
[40] 海龙. 兴安落叶松原始林和采伐后恢复林分的碳汇能力研究. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2009.
[41] 吴仲民, 李意德, 曾庆波, 周光益, 陈步峰, 杜志鹄, 林明献. 尖峰岭热带山地雨林 C 素库及皆伐影响的初步研究. 应用生态学报, 1998, 9(4): 341-344.
[42] Keith H, Mackey B G, Lindenmayer D B. Re-evaluation of forest biomass carbon stocks and lessons from the world's most carbon-dense forests. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, 106(28): 11635-11640.
[43] 周玉荣, 于振良, 赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡. 植物生态学报, 2000, 24(5): 518-522.
[44] 方运霆, 莫江明, Brown S, 周国逸, 张倩媚, 李德军. 鼎湖山自然保护区土壤有机碳贮量和分配特征. 生态学报, 2004, 24(1): 135-142.
[45] 姜发艳, 孙辉, 林波, 刘庆. 川西亚高山云杉人工林恢复过程中表层土壤碳动态变化. 应用生态学报, 2009, 20(11): 2581-2587.
[46] 孟莹莹, 包也, 郭焱, 王晓雨, 于大炮, 周莉, 代力民. 长白山风倒区自然恢复 26 年后土壤碳、氮含量特征. 生态学杂志, 2014, 33(7): 1757-1761.
[47] 张春娜, 延晓冬, 杨剑虹. 中国森林土壤氮储量估算. 西南农业大学学报: 自然科学版, 2004, 26(5): 572-575.
[48] 贺金生. 中国森林生态系统的碳循环: 从储量、动态到模式. 中国科学: 生命科学, 2012, 42(3): 252-254.
[49] Li T J, Liu G B. Age-related changes of carbon accumulation and allocation in plants and soil of black locust forest on Loess Plateau in Ansai County, Shaanxi Province of China. Chinese Geographical Science, 2014, 24(4): 414-422.
[50] 杨丽丽, 王彦辉, 文仕知, 刘延惠, 杜敏, 郝佳, 李振华. 六盘山四种森林生态系统的碳氮储量、组成及分布特征. 生态学报, 2015, 35(15): 5215-5227.
[51] 艾泽民, 陈云明, 曹扬. 黄土丘陵区不同林龄刺槐人工林碳、氮储量及分配格局. 应用生态学报, 2014, 25(2): 333-341.
[52] 黄宇, 冯宗炜, 汪思龙, 冯兆忠, 张红星, 徐永荣. 杉木、火力楠纯林及其混交林生态系统 C、N 贮量. 生态学报, 2005, 25(12): 3146-3154.
[53] 胡钧宇. 中国森林生态系统植物残体碳氮储量. 北京: 北京大学, 2013.
[54] Brown S. Measuring carbon in forests: current status and future challenges. Environmental Pollution, 2002, 116(3): 363-372.
[55] Muller R N, Liu Y. Coarse woody debris in an old-growth deciduous forest on the Cumberland Plateau, southeastern Kentucky. Canadian Journal of Forest Research, 1991, 21(11): 1567-1572.
[56] Harmon M E, Hua C. Coarse woody debris dynamics in two old-growth ecosystems. Bioscience, 1991, 41(9): 604-610.
[57] 唐旭利, 周国逸. 南亚热带典型森林演替类型粗死木质残体贮量及其对碳循环的潜在影响. 植物生态学报, 2005, 29(4): 559-568.
[58] 刘迎春, 于贵瑞, 王秋凤, 张扬建, 徐泽鸿. 基于成熟林生物量整合分析中国森林碳容量和固碳潜力. 中国科学: 生命科学, 2015,45(2): 210-222.